

高频强电场下的等离子体 X 光发射增强

冯贤平 范品忠 张正泉 徐至展
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报道 GaAs 和 Zn 激光等离子体在高频强电场击穿气体从而在靶周围形成一层电子云的条件下, 使等离子体高阶电离离子的 X 射线发射增强现象。

关键词: 高频强电场; X 射线辐射增强。

众所周知, 激光等离子体 X 射线辐射与等离子体参数关系极为密切, 不同条件下产生的等离子体对应着不同状态的 X 射线辐射^[1], 这种现象无论是对激光等离子体 X 射线诊断还是对于 X 射线激光的研究或者将等离子体作为某种短波辐射源来说都是极其有意义的^[2, 3]。

本文报道在实验中发现的在高频强电场影响下的激光等离子体 X 射线(LPX) 辐射增强现象。实验是在上海光机所千兆瓦大功率钨玻璃激光装置上进行的, 激光能量 4J, 脉宽 2ns, 由口径为 60mm, 焦距为 60mm 的非球面透镜将激光直接聚焦在气压为 10^{-4} Torr 真空室内的靶面上, 靶面功率面密度约 $5 \times 10^{18} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。实验采用的是锌、砷化镓两种平面靶, 在靶面附近约 0.5mm 处放置带引线的金属环如图 1 所示。

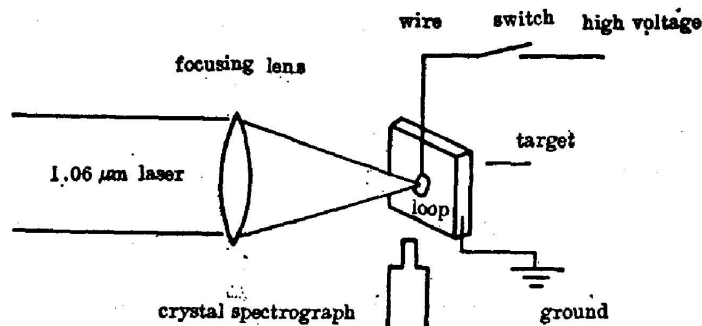


Fig. 1 Schematic of the experimental set up for taking the X-ray spectrum of laser plasma

本实验 X 光谱是用 TLAP 晶体谱仪拍摄的, 底片采用预先定标过的 5F 型胶片, 整个实验安排结构如图 1 所示。其优点是: (1) 激光能不受限制地穿过环直接辐照在靶面上; (2) 交流高压电场能较为均匀地施加于靶面; (3) 切断高压电场较为方便。当金属环接通高频交流场(频率约 150kHz, 电压 5kV)时, 受高频场的作用真空室内的稀薄气体被击穿从而使靶周围形成电子云(在靶周围有辉光现象)。图 2 就是受电子云影响下的砷化镓激光等离子体 X 射线谱, 图 3 是其对应的黑度扫描曲线。由光谱分析, 可发现等离子体 X 射线主要是由

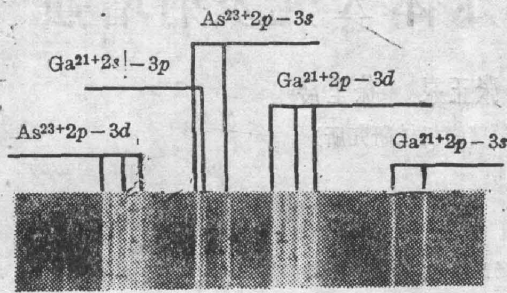


Fig. 2 GaAs LPX spectrum (with field)

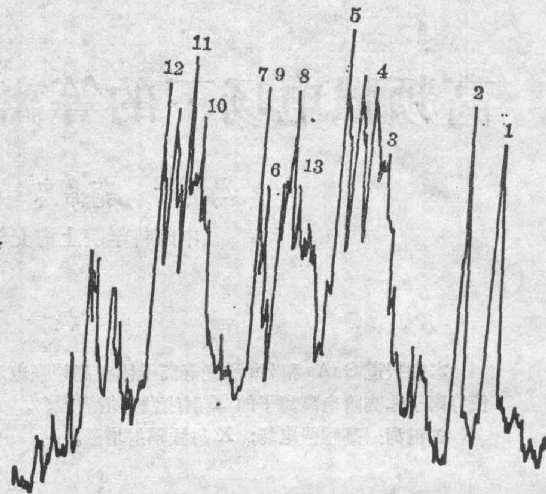


Fig. 3 Microdensitometer tracing from GaAs LPX spectrum (with field)

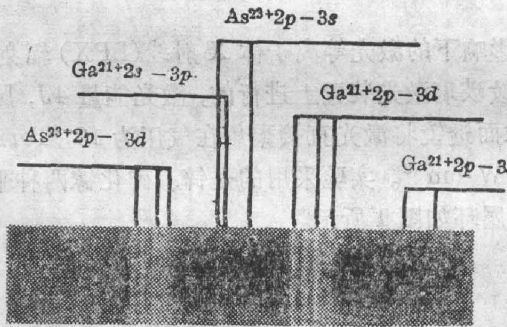


Fig. 4. GaAs LPX spectrum (without field)

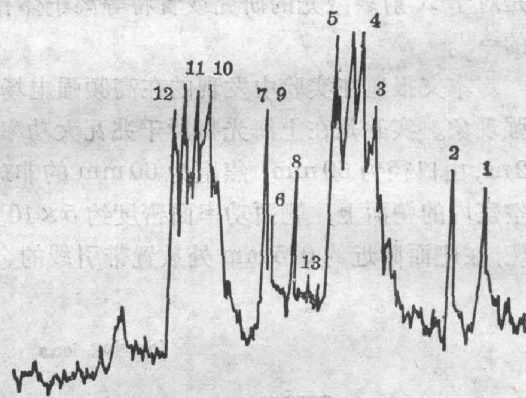


Fig. 5 Microdensitometer tracing from GaAs LPX spectrum (without field)

类氩和类氟离子在主量子数 $n = (3-2)$ 能级间的跃迁发射的。比较一般的光谱可发现其辐射较强。为了定性分析、比较无高频强电场下的激光等离子体 X 射线, 切断高压电源, 在透镜调焦误差不超过 1%, 激光能量变化不超过 10%, 即与第一次实验相比激光辐照靶上的功率面密度起伏不超过 11% 条件下获得无高频场下的砷化镓激光等离子体 X 射线谱如图 4 所示, 图 5 是其相对应的黑度扫描曲线。比较图 3、图 5 的黑度扫描曲线可以看出, 图 5 光谱主要也是由类氩离子和类氟离子在主量子数 $n = (3-2)$ 能级间跃迁发射的。但是, 各对应的线谱强度变化相当之大。

根据文献[4]中的底片标定曲线, 由图 3、图 5 可得出谱线强度之比, 发现在有场情况下镓的类氟离子光谱线辐射强度远大于无场情况下的谱线强度。实际谱线测量表明, 类氟离子的 $2p^5-2p^43s$ 跃迁一组谱线平均辐射强度之比 $(I_{\text{field}}/I_{\text{nofield}}) \geq 4$; 而对类氩离子强度增长相对来说要小些, $2p^6-2p^53s$ 跃迁一组谱线比值一般在 2.5 左右, $2p^6-2p^53d$ 谱线比值在 1.3 附近, 具体测量结果见表 1 所示。

Table 1

ion	No.	wavelength $\lambda(\text{\AA})$	states	term	$I_{(\text{field})}/I_{(\text{no field})}$
Ga ²⁺	1	10.832	$2p^6-2p^53s$	$1s_0-^3p_1$	2.45
	2	10.586	$2p^6-2p^53s$	$1s_0-^1p_1$	2.08
	3	9.970	$2p^6-2p^53d$	$1s_0-^3p_1$	1.38
	4	9.848	$2p^6-2p^53d$	$1s_0-^3p_1$	1.22
	5	9.641	$2p^6-2p^53d$	$1s_0-^1p_1$	1.62
	6	9.079	$2p^6-2s2p^53p$	$1s_0-^3p_1$	2.07
Ga ²¹⁺ +As ²³⁺	7+9	9.030	$2p^6-2s2p^53p$ $2p^6-2p^53s$	$1s_0-^1p_1$	2.05
As ²³⁺	8	9.272	$2p^6-2p^53s$	$1s_0-^3p_1$	3.15
	10	8.562	$2p^6-2p^53d$	$1s_0-^3p_1$	1.41
	11	8.467	$2p^6-2p^53d$	$1s_0-^3p_1$	1.97
	12	8.271	$2p^6-2p^53d$	$1s_0-^1p_1$	1.73
Ga ²²⁺	13		$2p^6-2p^43d$		4.25

从表 1 发现序数 8 的谱线增强要比同组态的其它谱线增强要快许多, 另外从图 3、图 5 也可发现序数 7 和 8 的两条谱线强度相对比差别很大, 在图 5 中 $(I_7/I_8) \approx 1.4$, 而在图 3 中 $(I_7/I_8) = 1$, 引起序数 7 和 8 两条谱线相对强度变化的原因是由于 8 线的位置正好是处在镱的类氟 $2p^5-2p^43d$ 射线位置上, 由于在外电场影响下, 类氟线辐射强度增加倍数要大于类氩谱线, 并且使这个强度叠加在砷的类氩线 $2p^6 1s_0-2p^53s^3p_1$ 上, 使 8 谱线背景变强, 因此, 在实际上加场后砷的类氩线 $2p^6 1s_0-2p^53s^3p_1$ 强度上升应小于 3.15 倍。

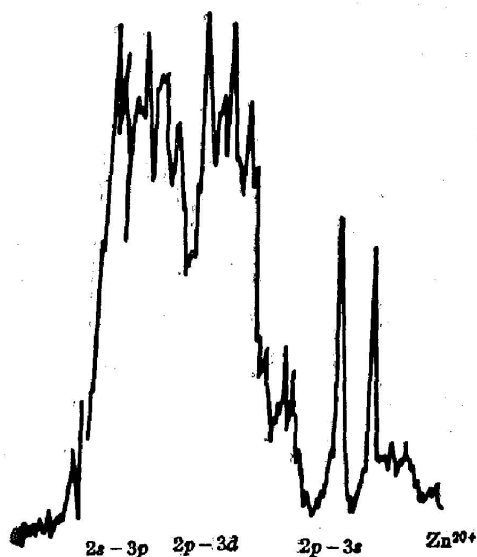


Fig. 6 Microdensitometer tracing from Zn LPX spectrum (with field)

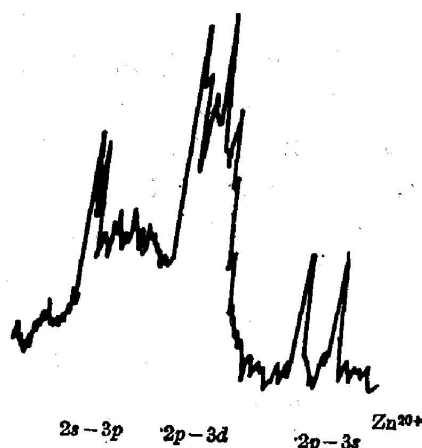


Fig. 7 Microdensitometer tracing from Zn LPX spectrum (without field)

从上面的实验现象可看出在高频强电场击穿稀薄气体影响下, 激光等离子体 X 射线辐射有加强趋势, 但是有趣的是其对应的等离子体电子温度并没有类似的上升现象, 假设本实验中的连续谱都是由复合辐射产生的^[5]

$$I_{fb} \propto g_{fb} \exp(-h\nu/kT_e).$$

则由连续谱斜率可测出两种条件下的电子温度并使它们作相互比较得 $(T_e)_{\text{field}} / (T_e)_{\text{no field}} \approx 0.7$ 。

在本实验两种条件下, 我们对 Zn 等离子体也作了类似的工作如图 6 和图 7 所示, 从两个黑度曲线比较中可以很容易地看出类氟离子谱线在有电场下的强度的增加倍数要大于类氟离子辐射的情况, 这个结果与上面砷化镓等离子体所反映的现象是一致的。

实验工作中得到赵世诚、周锦智、金仁山的帮助, 谨致感谢。

参 考 文 献

- [1] S. G. Dinev, Ch. I. Radev *et al.*; *Opt. Commun.*, 1979, **30**, No. 2 (Aug), 219~223.
- [2] C. DeMichelis, M. Mattioli; *Nucl. Fusion*, 1981, **21**, No. 6 (Jun), 677~749.
- [3] V. A. Bhagavatula, B. Yaakobi; *Opt. Commun.*; 1978, **24**, No. 3 (Mar), 331~335.
- [4] 毛楚生, 范品忠等; 《核聚变与等离子体物理》, 1983, **3**, No. 2 (Jun), 105~111.
- [5] 项志遯, 俞昌旋; 《高温等离子体诊断技术》, (上海科学技术出版社, 1982)。

Enhancement of X-ray emission from laser plasma in high frequency electric field

FENG XIANPING, FAN PINZHONG, ZHANG ZENGQUAN AND XU ZHIZHAN
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 29 April 1986)

Abstract

It was found experimentally that the X-ray emission was enhanced from GaAs and Zn plasmas irradiated by a Nd:glass laser pulse with width of 2 ns and on target power density of 5×10^{18} W/cm² in a high frequency electric field in 0.1 Torr air atmosphere. The intensity of X-ray was much stronger in the presence of the high frequency field than that without it. The ratios of the intensity $\alpha = I_{(\text{field})} / I_{(\text{no field})}$ were determined from the obtained spectra, however the plasma temperature deduced from the recombination continuum was lower in the presence of high frequency electric field ($T_e = 300$ eV) than that without it ($T_e = 430$ eV).

We also performed the same experiment for Zn and the similar result was obtained.

Key Words: high frequency electric field; enhancement of the X-ray emitting.